

EL TEMPS A LA PREHISTÒRIA I EL SEU ESTABLIMENT A TRAVÉS DE LA DATACIÓ PER RADIOCARBONI

Cronologia, datació per radiocarboni, data radiocarbònica, validesa de la data radiocarbònica.

Joan S. Mestres i Torres*

Se examinan las condiciones de validez de la fecha radiocarbónica y se introducen diversas fechas conceptuales (fecha arqueológica, fecha física, fecha radiocarbónica experimental, fecha radiocarbónica verdadera) que permiten llevar a cabo un análisis racional, sistemático y riguroso de la validez de las fechas radiocarbónicas. Como paso previo se revisan las características esenciales de la datación por radiocarbono.
Cronología, datación por radiocarbono, fecha radiocarbónica, validez de la fecha radiocarbónica

This paper explores the validity conditions for the radiocarbon date and introduces the different conceptual dates (archaeological date, physical date, experimental radiocarbon date, true radiocarbon date) that make possible to perform a rational, systematic and rigorous analysis of the validity of radiocarbon dates. By way of introduction to the study, a review of the essential features of radiocarbon dating is provided.
Chronology, radiocarbon dating, radiocarbon date, validity of the radiocarbon date

Les conditions de validité de la datation au radiocarbone sont examinées, plusieurs dates conceptuelles sont introduites (date archéologique, date physique, date radiocarbone expérimental, date radiocarbone véritable) qui font possible une analyse rationnelle, systématique et rigoureuse de la validité des dates radiocarbone. Préablement sont révisées les caractéristiques essentielles de la datation au radiocarbone.
Chronologie, datation au radiocarbone, date radiocarbone, validité du date radiocarbone

11

INTRODUCCIÓ

Tal com suggereix el títol del present dossier i els diferents apartats en què es divideix, pot bastir-se una prehistòria basada només en una cronologia relativa i totalment al marge del temps absolut; ara bé, el coneixement que proporciona una tal prehistòria, tot i ser vàlid, és incomplet, perquè obvia la situació de les diverses entitats que configuren la prehistòria dins la dimensió temporal i, a més, no permet l'establiment de relacions cronològiques per a les entitats arqueològiques entre regions geogràfiques allunyades. L'adveniment dels mètodes fisicoquímics de datació, amb la seva capacitat de determinar la data absoluta de la formació de determinats materials, ha permès situar els períodes

que configuren la prehistòria y altres entitats arqueològiques útils per al seu estudi dins del marc cronològic absolut. Entre totes les tècniques de datació químicofísica, la datació per radiocarboni és, sens dubte, la més difosa i la que ha estat objecte de més esforços per part dels investigadors per al seu perfeccionament. La datació per radiocarboni proporciona una escala cronològica absoluta de validesa universal i, conseqüentment, un marc comú de referència temporal que abasta des del Plistocè tardà fins a l'època subactual. L'assoliment de dates tan remotes ha fet possible una prehistòria d'abast mundial, ja que ha permès als prehistoriadors establir la sincronia o diacronia –i en aquest cas, l'ordre cronològic– de fenòmens arqueològics del món sencer.

* Laboratori de Datació per Radiocarboni. Serveis Científicotècnics de la Universitat de Barcelona. Facultat de Química de la UB, 3a. planta, js.mestres@ub.edu

La datació per radiocarboni pot definir-se com una tècnica analítica per a la determinació de la data d'esdeveniments (arqueològics, geològics, històrics, artístics, etc.) basada en la mesura del contingut de l'isòtop ^{14}C present en el carboni constituït d'un material adequat. Segons aquesta definició, la datació per radiocarboni no és un mètode observacional basat en la experiència personal, sinó que és un mètode objectiu basat en l'anàlisi quantitativa d'una espècie atòmica. Aquest atribut, que en principi sembla una qualitat positiva, suposa, tanmateix, serioses servituds. En efecte, la mateixa definició ja planteja una dicotomia palesa de conceptes: per un costat hi ha un esdeveniment, la data d'ocurrència del qual interessa determinar, i, per altra banda, cal un material adequat que proporcioni la data cercada. És necessari, doncs, posar en relleu les relacions existents entre el dos membres de la dicotomia: l'esdeveniment arqueològic i el material.

UTILITZACIONS DE LA DATA RADIOCARBÒNICA

Quan hom planteja la realització d'un inventari de dates radiocarbòniques referides a una regió geogràfica, es fa amb la finalitat d'extreure'n conclusions sobre la cronologia de la seva prehistòria i protohistòria. La data radiocarbònica és una font d'informació cronològica que pot utilitzar-se de dues maneres distintes segons el coneixement que es tingui de l'entitat arqueològica a què fa referència la data. Quan la data radiocarbònica fa referència a una entitat arqueològica prèviament definida, la data radiocarbònica s'integra en el repertori constituït per les altres dates referides a la mateixa entitat arqueològica –un període cronocultural, un estil ceràmic, un ritual d'enterrament, etc.– i, posteriorment, l'anàlisi d'aquest repertori permetrà estimar la duració de la vigència de l'entitat arqueològica en qüestió en el passat prehistòric i la seva situació dins del marc cronològic, és a dir, permetrà estimar el seu període de vigència. En aquestes condicions, les dates radiocarbòniques s'utilitzen amb una finalitat inductiva. Si, pel contrari, la data radiocarbònica no pot referir-se a una entitat arqueològica prèviament definida, però interessa conèixer la situació en el temps de l'esdeveniment arqueològic que representa i establir relacions cronològiques amb altres entitats arqueològiques ja definides, la seva data radiocarbònica pot comparar-se amb els períodes de vigència prèviament establerts per a altres entitats arqueològiques. En aquestes circumstàncies, la data radiocarbònica s'utilitza amb una finalitat deductiva. La forma més immediata d'utilitzar una data radiocarbònica és la deductiva, però convé observar que la utilització deductiva d'una data radiocarbònica exigeix una anàlisi inductiva prèvia, almenys informal o implícita, dels repertoris de dates radiocarbòniques de què ja es disposa.

En coherència amb el caràcter probabilístic de la data radiocarbònica (vegeu apartat Requisits d'ordre analític), el període de vigència d'una entitat arqueològica pot definir-se rigorosament d'una manera també probabilística (Mestres/Martín 1996; Martín/Mestres 2002) com l'interval de temps corresponent a una distribució de probabilitat dintre del qual hi ha una probabilitat no nul·la i calculable de trobar les dates que integren el repertori de dates representatives de l'entitat arqueològica en qüestió. Per a l'establiment del període de vigència poden utilitzar-se tant les dates radiocarbòniques com les dates calibrades (vegeu apartat L'escala cronològica radiocarbònica) i cadascun dels procediments presenta avantatges i inconvenients. Així, utilitzant les dates radiocarbòniques s'obtenen els períodes de vigència expressats en la escala cronològica radiocarbònica i es té l'avantatge de la facilitat de l'anàlisi inductiva a causa de la relativa senzillesa de l'expressió de les dates radiocarbòniques en comparació amb les dates calibrades. La utilització de les dates calibrades proporciona el període de vigència expressat en l'escala cronològica solar, però té l'inconvenient que dificulta l'anàlisi inductiva a causa de la complexitat de l'expressió de les dates calibrades. Per aquest motiu és convenient també l'expressió dels períodes de vigència en l'escala cronològica radiocarbònica per realitzar l'anàlisi inductiva d'una manera ràpida i senzilla.

Si s'admet la continuïtat temporal de la pervivència d'una entitat arqueològica, el seu període de vigència no pot presentar cap hiata de probabilitat, és a dir, *illes* de probabilitat separades de la resta de distribució de probabilitat per un interval de temps amb probabilitat nul·la; l'aparició d'un hiata de probabilitat pot ser degut a dues causes: una manca d'homogeneïtat del repertori de dates radiocarbòniques deguda a l'estat incomplet de la recerca arqueològica o bé a un defecte de validesa de la data radiocarbònica (vegeu apartat 3) de les dates responsables de l'*illa* de probabilitat. Si la causa de la illa de probabilitat fos la manca d'homogeneïtat del repertori de dates, cal esperar que l'avenç de la recerca arqueològica aportí noves dates radiocarbòniques que omplirien el buit de probabilitat. Sigui quina sigui la causa de la irregularitat, si el nombre de dates que integren el repertori és gran, la data responsable de l'*illa* de probabilitat a penes afecta l'expressió numèrica del període de vigència, si aquesta apareix en un dels extrems de la distribució de probabilitat, ja que la seva probabilitat pot caure dintre de la zona d'exclusió dels extrems de la distribució de probabilitat. Aquesta circumstància mostra que el càlcul probabilístic del període de vigència permet detectar la presència de possibles dates aberrants en un repertori de dates i també que és un mètode robust ja que les dates extremes del repertori exerceixen poca influència en el resultat de l'estimació (Mestres 2000a).

Sigui quina sigui la finalitat a què es destini una data radiocarbònica, ha de complir un requisit ineludible que és la seva validesa. Les condicions de validesa d'una data radiocarbònica són determinades per les seves característiques que al seu torn depenen de les propietats de la datació per radiocarboni. Amb la finalitat de definir i estudiar les condicions de validesa d'una data radiocarbònica, tot seguit, i com a pas previ, es revisen les característiques principals de la datació per radiocarboni.

CARACTERÍSTIQUES ESSENCIALS DE LA DATACIÓ PER RADIOCARBONI

La datació per radiocarboni consisteix en el càlcul del temps transcorregut entre dos moments concrets fent ús de la llei del decaïment radioactiu. Els moments concrets a què es refereix la datació per radiocarboni són un moment inicial en què el material que és objecte de la datació va deixar de bescanviar carboni amb el medi exterior o va cessar d'absorbir carboni del medi exterior¹ i un moment posterior que és el present (Mestres 2000b, 2003). Per al càlcul del temps transcorregut entre aquests dos moments la llei del decaïment radioactiu exigeix dos requisits experimentals: el coneixement del contingut específic inicial de ^{14}C corresponent al moment en què el material abandonà el dipòsit de bescanvi del carboni i el coneixement del contingut específic residual de ^{14}C del material corresponent a l'actualitat. El segon dels requisits no suposa altra dificultat experimental que la purament analítica, és a dir, mesurar amb la màxima exactitud i precisió possibles aquesta variable química; el primer dels requisits, tanmateix, suposa seriosos problemes teòrics perquè, el contingut específic inicial dels materials objecte de la datació pot esperar-se a priori que depengui del temps i del material, per la qual cosa no es pot conèixer amb exactitud. S'arriba així a una situació paradoxal en què per calcular el temps transcorregut abans cal conèixer precisament aquest mateix temps; si no es resol, doncs, la qüestió del desconeixement del contingut específic inicial de ^{14}C , la datació per radiocarboni cau en la inviabilitat.

Per tal de resoldre el problema de la seva viabilitat, la datació per radiocarboni exigeix l'adopció d'unes hipòtesis de treball que adquireixen la categoria d'hipòtesis fonamentals de la datació per radiocarboni. Les hipòtesis fonamentals de la datació per radiocarboni són les següents:

- El contingut específic de ^{14}C no depèn dels compartiments que integren el dipòsit de bescanvi del carboni, ni dels materials que es troben dins de cada compartiment, és a dir, és el mateix per a tots els materials que poden ser objecte de datació

- El contingut específic de ^{14}C en cadascun dels compartiments del dipòsit de bescanvi del carboni s'ha mantingut constant en el transcurs del temps

L'adopció d'aquestes hipòtesis fonamentals constitueix una simplificació notable perquè permet considerar un únic valor independent del material i del moment de la seva formació com a contingut específic inicial de ^{14}C . Les hipòtesis fonamentals s'apliquen conscientment acceptant el risc que no es compleixin amb total exactitud, ja que és l'única solució possible, si es vol dur a la pràctica la datació per radiocarboni. El mètode de treball que s'adopta és estudiar el compliment d'aquestes hipòtesis fonamentals i corregir-ne les eventuais desviacions en la mesura en què sigui possible. Plantejada d'aquesta manera, la datació per radiocarboni només proporcionarà resultats fidels en la mesura en què les hipòtesis fonamentals en què es basa la seva aplicació siguin exactes o bé que les seves eventuais desviacions siguin corregibles. Per fidelitat dels resultats s'entén que la datació per radiocarboni proporcioni el temps transcorregut des que un material abandonà el dipòsit de bescanvi del carboni fins el present expressat en l'escala cronològica habitual, és a dir, l'escala cronològica solar que adopta com a unitat cronomètrica l'any solar o període de temps emprat per la Terra en dur a terme una revolució completa al voltant del Sol.

EXAMEN DEL COMPLIMENT DE LES HIPÒTESIS FONAMENTALS

Cap de les dues hipòtesis fonamentals és rigorosament exacta, sinó que estan subjectes a desviacions que a continuació s'examinaran per estudiar quines són corregibles i quines no. Al compliment de la primera de les hipòtesis fonamentals s'oposen tres fenòmens: un de naturalesa química, el fraccionament isotòpic, i dos de naturalesa geoquímica, l'efecte compartiment i l'efecte hemisferi. Experimentalment, s'ha pogut comprovar que la segona hipòtesi tampoc no és exacta.

EL FRACCIONAMENT ISOTÒPIC

El fraccionament isotòpic consisteix en el fet que en tot canvi químic o físic en què participin els distints isòtops d'un mateix element es produeix un enriquiment o un empobriment en cadascun dels isòtops que depèn de la naturalesa del canvi. L'efecte d'aquest fenomen en els materials que contenen carboni és que materials contemporanis presentin un contingut específic de ^{14}C diferent que depèn del compartiment en què s'han format i que, per tant, proporcionin dates diferents. Així,

1.- El moment inicial correspon al moment en què el material es va formar o bé al moment de la mort de l'organisme vivent que el sustentava.

per exemple, la fotosíntesi a partir del diòxid de carboni de l'aire es realitza preferentment sobre els isòtops més lleugers del carboni i per aquest motiu, el contingut de ^{13}C i ^{14}C dels vegetals és lleugerament més petit que el de l'atmosfera d'on procedeix el carboni; inversament, la dissolució del diòxid de carboni de l'aire en l'aigua es duu a terme preferentment sobre els isòtops més pesants i per aquest motiu el contingut de ^{13}C i ^{14}C en la hidrosfera és lleugerament més gran que a l'atmosfera. Si aquest fenomen no es corregís, s'arribaria a la situació paradoxal que materials contemporanis originats a distints compartiments presentarien edats diferents. Així, en el cas del dos exemples citats, materials contemporanis formats a la biosfera terrestre i als oceans serien, respectivament, més vells o més joves que la mateixa atmosfera, no per decaïment radioactiu, sinó per fraccionament isotòpic.

Afortunadament, l'efecte del fraccionament isotòpic es pot corregir a través de les mesures de la relació isotòpica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ expressades amb el paràmetre $\delta^{13}\text{C}$ (Mestres 2000b, 2003). Perquè les dates radiocarbòniques siguin comparables és doncs necessari que s'hagi mesurat el fraccionament isotòpic i que s'hagi aplicat la correcció pertinent en el càlcul de la data.

L'EFECTE COMPARTIMENT

El carboni que es troba en els diferents compartiments que constitueixen el dipòsit de bescanvi del carboni contínuament es transfereix d'uns compartiments als altres i cada compartiment és caracteritzat pel seu període de residència (*loc.cit.*). Els diferents períodes de residència del carboni en els distints compartiments poden originar diferències en el contingut específic de ^{14}C d'equilibri en cada compartiment degudes al decaïment radioactiu. A causa dels períodes de residència curts i similars del carboni a la atmosfera, biosfera terrestre i a l'humus, el contingut específic de ^{14}C en aquests compartiments és pràcticament idèntic; tanmateix, el llarg període de residència del carboni en la massa oceànica origina un contingut específic de ^{14}C deficitari respecte als altres compartiments. Així doncs, representant per D el contingut específic de ^{14}C i mitjançant els subíndexs A, B, H i HM l'atmosfera, la biosfera terrestre, l'humus i la hidrosfera marina, respectivament, pot escriure's:

$$D_A \approx D_B \approx D_H > D_{HM}$$

L'EFECTE HEMISFERI

Com que la superfície oceànica és més gran a l'Hemisferi Sud que a l'Hemisferi Nord, el bescanvi de carboni entre la hidrosfera marina i l'atmosfera és més intens en l'Hemisferi Sud i, en conseqüència, la biosfe-

ra terrestre y el humus d'aquest hemisferi es troben empobrits en ^{14}C en relació amb l'Hemisferi Nord.

CONTRAVENCIONS A LA SEGONA HIPÒTESI

Respecte a la segona hipòtesi que el contingut de ^{14}C a tot el dipòsit de bescanvi del carboni s'ha mantingut constant en el transcurs del temps, s'han trobat evidències experimentals que la hipòtesi no es compleix rigorosament, sinó que hi ha hagut fluctuacions del contingut de ^{14}C . Aquestes evidències les ha proporcionades la dendrocronologia: el contingut de ^{14}C de cadascun dels anells de creixement dels arbres és un reflex fidel del contingut de ^{14}C atmosfèric durant l'any que es va formar i en els altres materials formats directament o indirecta a partir del ^{14}C atmosfèric. L'estudi minuciós de successions d'anells d'arbres vius i fòssils proporciona un llarg registre cronològic de fusta d'edat exactament coneguda i la mesura del contingut actual de ^{14}C de la cel·lulosa d'aquests anells permet calcular el seu contingut inicial, amb la qual cosa s'ha pogut comprovar que aquest no s'ha mantingut constant en el transcurs del temps (Mestres 2000b, 2005).

L'ESCALA CRONOLÒGICA RADIOCARBÒNICA

La viabilitat de la datació per radiocarboni exigeix l'adopció d'unes hipòtesis fonamentals que estan afectades de desviacions que no sempre són corregibles. Conseqüentment, les dates determinades mitjançant aquest mètode també estan afectades de desviacions respecte de les dates expressades en l'escala cronològica solar. L'única de les desviacions de les hipòtesis fonamentals que és corregible en tota la seva extensió és el fraccionament isotòpic. En conseqüència, la utilització del mètode de datació per radiocarboni, aplicant la correcció per fraccionament isotòpic, origina una escala cronològica convencional pròpia de la datació per radiocarboni anomenada escala cronològica radiocarbònica i que discrepa de l'escala cronològica solar. En resum, el resultat d'una datació per radiocarboni és una magnitud cronomètrica anomenada **data o edat radiocarbònica** i la unitat en què s'expressen les dates radiocarbòniques es denomina **any BP**; la unitat cronomètrica, l'any BP, no és constant, sinó que varia en el transcurs del temps i l'origen de l'escala cronològica radiocarbònica és, per definició, **l'any 1950 dC**.

CARACTERÍSTIQUES DE L'ESCALA CRONOLÒGICA RADIOCARBÒNICA

Conseqüència immediata de la relació existent entre els continguts específic de ^{14}C dels diversos compartiments que integren el dipòsit de bescanvi del carboni

$$D_A \approx D_B \approx D_H > D_{HM}$$

i de la primera hipòtesi fonamental, que considera un mateix contingut inicial de ^{14}C per a tots els compartiments, és la discordança entre les dates radiocarbòniques de materials contemporanis formats a l'atmosfera, biosfera terrestre i humus i els formats en el medi marí. Així, representant per R la data radiocarbònica, per a un conjunt de materials contemporanis formats en aquest quatre medis, és a dir, amb la mateixa edat expressada en l'escala cronològica solar, es compleix la relació següent:

$$R_A \approx R_B \approx R_H < R_{HM}$$

és a dir, la datació per radiocarboni proporciona un sistema dual de dates dependent de l'origen del material datat. Aquesta darrera afirmació necessita encara una matisació: a causa de la facilitat de la mescla dels gasos atmosfèrics, dins de cada hemisferi la atmosfera és homogènia en relació amb el contingut específic de ^{14}C i, per tant, dins de cada hemisferi els materials terrestres, és a dir, els materials originats a la biosfera terrestre i a l'humus, presenten la mateixa data radiocarbònica que la atmosfera –després d'haver practicat la correcció pel fraccionament isotòpic–. No s'esdevé el mateix a la hidrosfera marina, que per la seva enorme grandària i per la complexitat de la seva dinàmica no és un medi homogeni en relació amb el contingut específic de radiocarboni, per la qual cosa la data radiocarbònica pot dependre de l'origen geogràfic del material. En resum, materials coetanis d'origen marí poden proporcionar dates radiocarbòniques diferents entre sí i, a més, sistemàticament més altes que les que proporcionen els materials d'origen terrestre contemporanis.

La conseqüència de l'efecte hemisferi és que les dates dels materials d'origen terrestre formats a l'Hemisferi Sud presenten una data radiocarbònica més alta que el materials contemporanis formats a l'Hemisferi Nord.

Per transformar les dates radiocarbòniques de materials d'origen terrestre tant de l'Hemisferi Nord com de l'Hemisferi Sud i les dates radiocarbòniques de materials d'origen marí en dates expressades a l'escala cronològica solar cal recórrer al calibratge de les dates radiocarbòniques (Reimer *et al.* 2004; Hughen *et al.* 2004; McCormac *et al.* 2004). Les dates calibrades, tanmateix, són d'expressió complexa a causa de llur caràcter probabilístic que no s'ajusta a una distribució de probabilitat de Gauss.

LA VALIDESA DE LES DATES RADIOCARBÒNIQUES

La datació per radiocarboni és un procés complex que inclou una gran varietat d'aspectes i en cal el coneixement de tots per comprendre llur efecte sobre la data radiocarbònica. Les característiques d'una data radiocarbònica obeeixen a la pròpia naturalesa de la datació per radiocarboni, a la naturalesa del fenomen físic en

què es basa la datació per radiocarboni –la desintegració radioactiva–, a la naturalesa del material datat i a les tècniques químiques i analítiques emprades per obtenir la data radiocarbònica.

La data radiocarbònica obtinguda en un procés de datació es refereix primàriament al material que ha estat objecte de la datació, però transcendeix al mateix material datat, ja que se n'extreuen conclusions cronològiques que s'extrapolen a àmbits d'abast molt més extens. Així, quan un arqueòleg proporciona al laboratori de datació una mostra de material carbonós trobat en un context habitacional amb presència de ceràmica i altres materials arqueològics que permeten una atribució cronocultural precisa al context arqueològic, de fet, no li interessa la data radiocarbònica del material, sinó que li interessa la data d'un esdeveniment arqueològic que fou l'ocupació d'un espai físic per una comunitat humana associada a una determinat període cronocultural i a un mode de vida. D'aquesta data posteriorment se n'extreuen conclusions com ara les dates d'inici i final del període cronocultural o les dates d'inici o final de la utilització d'un determinat estil de ceràmica, o bé la duració del període cronocultural o el període de vigència de l'estil ceràmic.

Per la seva pròpia naturalesa, la datació per radiocarboni data el moment en què el material objecte de la datació va abandonar el dipòsit de bescanvi del carboni i no pas l'esdeveniment arqueològic en què participà el material datat. Aquesta característica particular dona origen a dos conceptes clarament distints: la data radiocarbònica pròpia del material datat, entesa com una característica física del mateix material, i la data pròpia de l'esdeveniment arqueològic que es pretén datar, que és la que realment interessa a l'arqueòleg. Aquestes dues dates s'anomenen, respectivament, data física i data arqueològica. En l'exemple citat anteriorment, la data arqueològica correspon al moment de l'ocupació del context habitacional per la comunitat humana i la data física es refereix al moment en què el material que compon els teixits vegetals –i que posteriorment va originar el carbó–, va abandonar el dipòsit de bescanvi del carboni. La data física i la data arqueològica poden ser diferents.

Una data radiocarbònica, com tota mesura analítica, no és més que una aproximació al valor veritable de la magnitud que es pretén mesurar. Aquesta característica de la mesura analítica implica l'aparició d'altres dos conceptes clarament diferenciats: la veritable data radiocarbònica, que correspon a la data física del material datat, i la data radiocarbònica experimental mesurada pel laboratori de datació.

Perquè la data radiocarbònica sigui vàlida ha de complir una condició ineludible, que és la seva utilitat per al propòsit a què es destina. Així doncs, com que el propòsit d'una datació per radiocarboni és determinar la

data d'un esdeveniment arqueològic, la condició necessària i suficient que ha de complir una data radiocarbònica perquè sigui vàlida és que el seu valor experimental sigui igual a la data arqueològica de l'esdeveniment que es pretén datar. Per a la validesa d'una data radiocarbònica s'han de complir tres categories de requisits: requisits d'ordre químic, que fan referència a l'origen i a la naturalesa química del material objecte de datació, requisits d'ordre analític, relatius a la mesura del contingut de ^{14}C del material datat i requisits d'ordre arqueològic, que fan referència a la relació entre el material datat i l'esdeveniment arqueològic que es pretén datar.

REQUISITS D'ORDRE QUÍMIC

Perquè una data radiocarbònica pugui ser vàlida abans que res cal qüestionar-se la capacitat del material datat per produir una data radiocarbònica vàlida. Per a l'acompliment d'aquests requisits s'han de respectar dues condicions necessàries:

1. Compliment de la primera hipòtesi fonamental en què es basa la datació per radiocarboni: el contingut específic de ^{14}C és el mateix en tot el dipòsit de bes-canvi del carboni i és independent del material
2. Possibilitat d'una eliminació eficaç de la contaminació

COMPLIMENT DE LA PRIMERA HIPÒTESI FONAMENTAL

L'atmosfera, la biosfera terrestre i l'humus compleixen la primera hipòtesi i, per tant, els materials procedents d'aquests compartiments, són, almenys teòricament, excel·lents materials per a la datació per radiocarboni. La hidrosfera presenta un contingut de ^{14}C deficitari respecte als altres compartiments i per aquest motiu els materials que en procedeixen proporcionen dates més altes que el materials contemporanis originats als altres compartiments. Per corregir l'excés d'edat radiocarbò-

nica que afecta els materials d'origen marí es pot fer servir l'edat aparent (Mestres 2000b, 2003), amb les limitacions que comporta² o bé cal recórrer a llur calibratge amb la corba de calibratge per a materials marins amb les dificultats que això implica³. La Taula I mostra una relació de materials que poden ser objecte de datació per radiocarboni classificats en funció de llur origen. Evidentment, una condició necessària que ha de complir un material perquè pugui ser objecte de datació és que sigui imperible o que, almenys, tingui una durabilitat més gran que la seva edat.

Hi ha alguns materials formats a la biosfera terrestre que contravenen la primera condició. Així, els materials biogènics formats en aigües continentals de regions calcàries tenen un contingut específic de ^{14}C deficitari, a causa de la dissolució de les roques calcàries i en conseqüència també la matèria orgànica procedent dels éssers vivents formats en aquest medi tindrà un contingut de ^{14}C deficitari i proporcionarà edats radiocarbòniques més altes. L'efecte compartiment que afecta la hidrosfera marina no tan sols es manifesta en els materials d'origen marí, sinó que pot estendre's als materials d'origen terrestre en aquells casos en què la dieta d'origen marí és important en els animals terrestres; en aquestes circumstàncies el contingut de ^{14}C dels materials procedents d'aquells organismes és més baix per la presència d'una fracció de carboni d'origen marí, la proporció del qual depèn de la proporció de dieta d'origen marí; la conseqüència de la presència d'una fracció de carboni d'origen marí en els éssers terrestres amb dieta mixta terrestre i marina és que llurs materials proporcionen dates radiocarbòniques sistemàticament altes⁴. Les closques de gastròpodes terrestres (Evin 1983) tampoc no compleixen la primera condició, perquè el carboni assimilat per a la síntesi del carbonat càlcic de la closca procedeix en part del sòl; per aquest motiu, el contingut inicial de ^{14}C és més baix que el de la biosfera i aquests materials proporcionen també dates radiocarbòniques sistemàticament altes.

2.- L'edat aparent podria servir per transformar les dates radiocarbòniques de materials d'origen marí en les seves equivalents per a materials contemporanis d'origen terrestre; malauradament, depèn de l'origen geogràfic del material i del moment de la seva formació per la qual cosa resulta difícil conèixer el valor adequat per a cada circumstància (Monge Soares/Alveirinho Dias 2006, 2007).

3.- La corba de calibratge per a materials d'origen marí no és universal com la corba de calibratge de materials d'origen terrestre, sinó que s'ha d'ajustar a les condicions locals a través d'un paràmetre empíric anomenat AR que està afectat dels mateixos problemes que l'edat aparent (*loc. cit.*).

4.- La dieta d'origen marí pot deduir-se a través de l'anàlisi isotòpica de ^{13}C (Chisholm *et al.* 1982) i ^{15}N (Schwarcz 1991) i la data radiocarbònica derivada de tals materials pot calibrar-se si es coneix la fracció de la dieta d'origen marí (Chisholm *et al.* 1982) i el valor de AR propi de la regió geogràfica i de l'època cronològica d'on prové la dieta marina.

Atmosfera	Biosfera terrestre	Humus	Hidrosfera marina
Morter	Fusta	Torba	Closques
	Carbó		Coralls
	Llavors carbonitzades		
	Pol·len		
	Espart		
	Vímet		
	Paper		
	Papir		
	Teixits		
	Ossos		
	Dents		
	Banyes		
	Cabells		
	Closques d'ou		
	Cera		
	Cuir		
	Pergamí		

Taula 1. Materials aptes per a la datació classificats en funció del seu origen

POSSIBILITAT D'ELIMINACIÓ EFICAÇ DE LA CONTAMINACIÓ

Per contaminació d'un material objecte de datació s'entén la presència en tal material de substàncies concomitants que contenen carboni amb una data física diferent a la del material o bé alienes al dipòsit de bescanvi del carboni. Si les substàncies concomitants no es poden separar per mitjans físics o químics, és a dir, si la contaminació no pot eliminar-se d'una manera eficaç, el material no proporcionarà una data radiocarbònica vàlida. La datació d'ossos proporciona un exemple de contaminació impossible d'eliminar amb eficàcia. En efecte, tot i que el col·lagen dels ossos no és susceptible de bescanvi de carboni amb el medi exterior, sí que és possible l'adquisició d'aquest element a través de la seva combinació química amb els àcids húmics del sòl per formar compostos húmico-proteics. Els àcids húmics combinats amb el col·lagen no poden separar-se d'aquest per mitjans químics i s'integren en el col·lagen extret de l'os en forma de gelatina. Atès que els àcids húmics del sòl són de formació posterior a la de l'os, l'efecte de la seva presència en la gelatina derivada del col·lagen fóra un rejuveniment de la seva data radiocarbònica experimental i, conseqüentment, una disminució de l'exactitud de la data radiocarbònica. La probabilitat d'incorporació d'àcids húmics procedents del sòl augmenta amb el grau de deteriora-

ment de l'os, el qual es fa palès amb un baix contingut de col·lagen. La incorporació d'àcids húmics en el col·lagen pot fer-se palesa mitjançant la relació C/N⁵ calculada a través de l'anàlisi elemental de la gelatina resultant de l'extracció del col·lagen (DeNiro 1985).

REQUISITS D'ORDRE ANALÍTIC

Abans d'examinar els requisits d'ordre analític que ha de complir una data radiocarbònica per a la seva validesa és convenient recordar-ne una característica essencial. Una data radiocarbònica no és un valor puntual, sinó que és un interval de temps en el que hi ha una probabilitat no nul·la y calculable que en el seu interior es trobi la data radiocarbònica veritable (Mestres 2000b). La relació entre l'interval de temps i la probabilitat respon a una distribució de probabilitat de Gauss centrada en la data radiocarbònica experimental R i amb una desviació típica $\sigma(R)$; per aquest motiu, una data radiocarbònica s'expressa mitjançant el format $R \pm \sigma(R)$, que explicita els dos paràmetres que defineixen sense ambigüitat la distribució de probabilitat de Gauss. La Figura 1 mostra la representació gràfica d'una distribució de probabilitat de Gauss associada a una data radiocarbònica indicant el seu valor experimental R , la seva desviació típica $\sigma(R)$ i un possible valor de la veritable data radiocarbònica R_v .

5.- Si la relació C/N no supera un determinat valor crític, els ossos proporcionen dates radiocarbòniques exactes

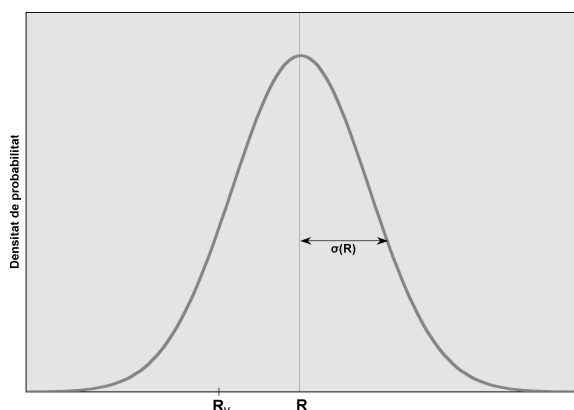


Figura 1. Representació gràfica de la distribució de probabilitat de Gauss associada a una data radiocarbònica. Es mostren el paràmetres que la defineixen: la data radiocarbònica experimental R , la seva desviació típica $\sigma(R)$ i també un possible valor de la data radiocarbònica veritable R_v .

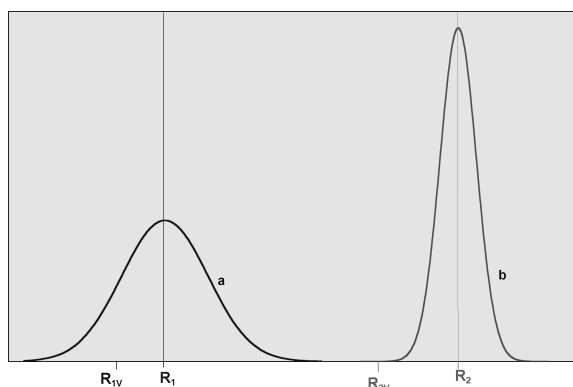


Figura 3. Representació gràfica de dues dates radiocarbòniques experimentals: $R_1 \pm \sigma(R_1)$ i $R_2 \pm \sigma(R_2)$ i els seus valors veritables respectius R_{1v} i R_{2v} . La primera és una data exacta, perquè la seva distribució de probabilitat inclou la data veritable amb una probabilitat raonable; la segona és una data inexacta. En aquest cas particular, la data menys precisa és la més exacta

El requisits d'ordre analític que ha de respectar una data radiocarbònica són que compleixi les condicions de precisió i d'exactitud. La precisió fa referència a l'amplitud de l'espai de temps en què es pot trobar la veritable data radiocarbònica. És evident que com més estreta sigui la distribució de Gauss associada a la data radiocarbònica, més limitat és l'interval de temps capaç de contenir la data radiocarbònica veritable. En conseqüència, el requisit que ha de complir una data radiocarbònica perquè sigui precisa és, òbviament, que la seva desviació típica $\sigma(R)$ sigui petita. La precisió d'una data radiocarbònica depèn de la quantitat de material de què es disposa per dur a terme la datació, de la seva antiguitat i del temps invertit en la mesura del con-

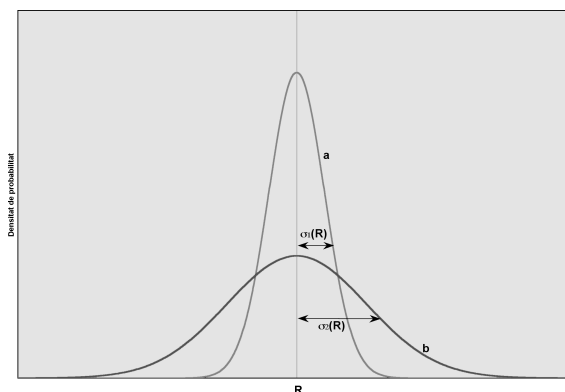


Figura 2. Representació gràfica de les distribucions de probabilitat de Gauss associades a una data radiocarbònica experimental amb precisió elevada (a) i a una altra amb precisió baixa (b)

tingut de ^{14}C . La Figura 2 mostra una data radiocarbònica amb precisió elevada i una data radiocarbònica amb precisió baixa.

Per exactitud d'una data radiocarbònica s'entén la bona correspondència entre la data radiocarbònica experimental i la data radiocarbònica veritable del material datat. L'exactitud d'una data radiocarbònica depèn de tres factors: de la idoneïtat i la qualitat del procediment aplicat per eliminar la contaminació –l'elecció encertada del qual depèn de la informació subministrada per l'arqueòleg al laboratori–, de la bondat del procediment químic tendent a la mesura del contingut de ^{14}C i de la qualitat de la mateixa mesura del contingut de ^{14}C . Una deficiència en qualsevol d'aquests factors causa un error sistemàtic, que es manifesta en un desplaçament de la data experimental tal que la data veritable ja no cau a l'interior de l'espai de temps definit per la distribució de probabilitat de Gauss associada a la data experimental. La Figura 3 mostra una data radiocarbònica exacta (a) i una data radiocarbònica afectada d'un error sistemàtic (b) i, per tant, inexacta. Com més precisa és una data radiocarbònica més ben definida resulta la seva exactitud, perquè la data radiocarbònica veritable es trobarà en un interval de temps més estret (vegeu figures esmentades). El compliment del requisit d'exactitud no implica la igualtat rigorosa entre la data física i la data experimental, sinó que només és necessari que la data veritable es trobi dintre de la distribució de probabilitat en una zona de densitat de probabilitat raonablement alta. En aquest sentit una data radiocarbònica imprecisa pot ser també exacta (Figura 2a). Expressat d'una forma aproximada però simple, pot afirmar-se que una data radiocarbònica és exacta quan el seu valor veritable es troba dins l'interval de temps limitat per la distribució de probabilitat de Gauss, i és inexacta quan cau fora

d'aquest interval. El grau de validesa d'una data radiocarbònica respecte a la seva precisió no és un concepte absolut, sinó que depèn de la disponibilitat i precisió d'altres dates relacionades amb ella. Com que la data física és igual a la data veritable, l'exactitud garanteix la bona correspondència entre la data radiocarbònica experimental i la data física del material objecte de datació. En resum, el compliment dels requisits d'ordre analític garanteix que amb un baix nivell d'incertesa la data radiocarbònica experimental es correspongui amb la data física del material.

REQUISITS D'ORDRE ARQUEOLÒGIC

El compliment dels requisits químics i analítics és una condició necessària, però no suficient per a la validesa d'una data radiocarbònica; s'ha de complir una altra condició necessària i és que la data radiocarbònica sigui representativa de l'esdeveniment o context arqueològic que s'intenta datar. Per representativitat d'una data radiocarbònica s'entén la igualtat entre la data física del material datat i la data arqueològica del context o esdeveniment arqueològic que es pretén datar. Perquè una data radiocarbònica sigui representativa, el material datat ha de complir dues condicions necessàries: en primer lloc, que el material mateix o la seva presència en el context arqueològic ha de ser producte de l'activitat biològica, social o tècnica del grup humà que creà el context o protagonitzà l'esdeveniment arqueològic i, en segon lloc, que el moment que el material datat va abandonar el dipòsit de bescanvi del carboni, és a dir, la seva data física, sigui igual a la de l'esdeveniment o al context arqueològic que hom pretén datar. Aquestes dues condicions del material datat s'anomenaran associació arqueològica i sincronia, respectivament, i llur compliment simultani conforma la representativitat de la data radiocarbònica.

L'associació arqueològica depassa l'associació purament física, ja que aquesta pot ser el resultat de la intrusió de materials aliens (infiltració, bioturbació,...) al nivell o context arqueològics datats; a més, l'associació arqueològica no comporta forçosament la sincronia, ja que pot haver-hi associació arqueològica sense sincronia quan la data física del material associat arqueològicament és més antiga que la data arqueològica. L'associació arqueològica és, doncs, una condició necessària per a la representativitat, però no suficient. Com a exemple d'associació arqueològica i manca de sincronia poden citar-se els elements constructius de fusta d'una estructura arquitectònica; en efecte, si hom pretén datar la construcció de l'estructura arquitectònica, tals elements estan, evidentment, associats a l'estructura arquitectònica, perquè són el resultat de l'activitat tècnica del grup humà que la construí, però si la fusta fou reutilitzada, procedent d'una construcció

més antiga, o bé procedent d'arbres ja morts en el moment de llur utilització, mancaria el requisit de la sincronia y la fusta no representaria l'esdeveniment arqueològic que es pretén datar, que és la construcció de la estructura arquitectònica. Un altre exemple de manca de sincronia el constitueix la datació d'un artefacte d'os perfectament associat al seu context arqueològic, però elaborat sobre una peça d'os ja antiga en el moment de la seva talla; la data física correspondria al moment de la formació de l'os i no al moment de l'elaboració de l'artefacte que és l'esdeveniment arqueològic. L'estudi de la colonització d'illes proporciona també un exemple de materials amb una associació arqueològica indubtable però amb manca de sincronia: s'esdevé sovint que els primers pobladors utilitzessin com a material constructiu (Anderson 1991) o com a combustible per a les llars de foc fusta trobada morta durant llurs primeres incursions; no hi ha dubte que la fusta utilitzada com a element arquitectònic o bé el carbó residual dels fogars és associat amb l'esdeveniment arqueològic de la colonització perquè és un producte de l'activitat tècnica dels primers ocupants, però manca el requisit de la sincronia, perquè la fusta ja tenia una determinada edat en el moment de la seva utilització. Per altra banda, l'associació d'un material a un context arqueològic és més probable com més massiva hi sigui la seva presència, ja que aleshores és molt probable que la seva presència sigui producte de l'activitat antròpica i no fruit de la casualitat; inversament, la presència en un context arqueològic d'un únic element material, tal com un únic fragment de carbó o una única llavor carbonitzada, pot ser producte d'un incident fortuït (intrusió per infiltració, bioturbació,...) i per tant la probabilitat de l'associació arqueològica és més baixa. El material objecte de la datació pot tenir una data física més antiga que el moment en què es va associar arqueològicament al context arqueològic que es pretén datar, és a dir, que els defectes de sincronia produeixen dates radiocarbòniques més altes que les dates arqueològiques.

CONCLUSIONS

La consideració de les condicions de validesa de la data radiocarbònica i la utilització de les dates conceptuals enunciades i definides més amunt: data arqueològica, data física, data radiocarbònica experimental i data radiocarbònica veritable, permeten dur a terme una anàlisi racional, sistemàtica i rigorosa de la validesa de les dates radiocarbòniques, si hom disposa de la suficient i adequada informació arqueològica, subministrada per l'arqueòleg, i analítica, subministrada pel laboratori de datació. Davant una data radiocarbònica presumptament aberrant, i per tant inexacta, és conve-

nient dur a terme l'anàlisi sistemàtica de les possibles causes d'error per tal d'esbrinar-ne l'origen i d'evitar-lo en una eventual futura repetició de la datació. En primer lloc s'examinarà la idoneïtat del material per a la seva datació en el sentit que no contravingui la primera hipòtesis fonamental de la datació per radiocarboni i s'estudiarà la possibilitat de la presència en el material objecte de la datació de contaminants no eliminats per impossibilitat o desconexença. Si el material és idoni per a la datació, l'etapa següent és examinar la seva representativitat: en primer lloc s'examina si l'associació arqueològica; si l'associació arqueològica és fora de tot dubte, cal considerar la possibilitat d'una manca de sincronia. Finalment, si la representativitat del material datat és també inqüestionable, cal cercar la causa de l'error al laboratori, ja sigui per un error químic en l'eliminació de contaminació inadvertida per poc habitual o desconexença, o bé en un error analític a l'hora de la mesura del contingut específic de ^{14}C en el material objecte de la datació o en la mesura del contingut específic inicial de ^{14}C .

Les dates conceptuals exposades permeten tancar la dicotomia enunciativa a la introducció d'aquesta col·laboració. En efecte, el procés de datació ideal consistiria en l'obtenció d'una data arqueològica a partir d'un material; tanmateix, el procés de datació real aplicat al material proporciona una data radiocarbònica

experimental que és una aproximació a la data física del material. És competència del laboratori que hi hagi una bona correspondència entre la data radiocarbònica experimental i la data física del material (exactitud) amb un baix nivell d'incertesa (precisió), però és competència de l'arqueòleg que hi hagi una bona correspondència entre la data física del material datat i la data arqueològica per la qual està interessat (representativitat), assegurant que es compleixin els requisits de l'associació arqueològica i la sincronia. La Figura 3 mostra un resum esquemàtic de les relacions establertes entre les distintes classes de dates definides.

BIBLIOGRAFIA

- ANDERSON, A. 1991, The Chronology of Colonization in New Zealand, *Antiquity* 65, 767-795.
- CHISHOLM, B.S., NELSON, D.E., SCHWARCZ, H.P. 1982, Stable-Carbon Isotope Ratios as a measure of marine versus terrestrial protein in ancient diets, *Science* 216, 1131-1132.
- DENIRO, M.J. 1985, Post-mortem preservation and alteration of in vivo bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction, *Nature* 317, 806-809.

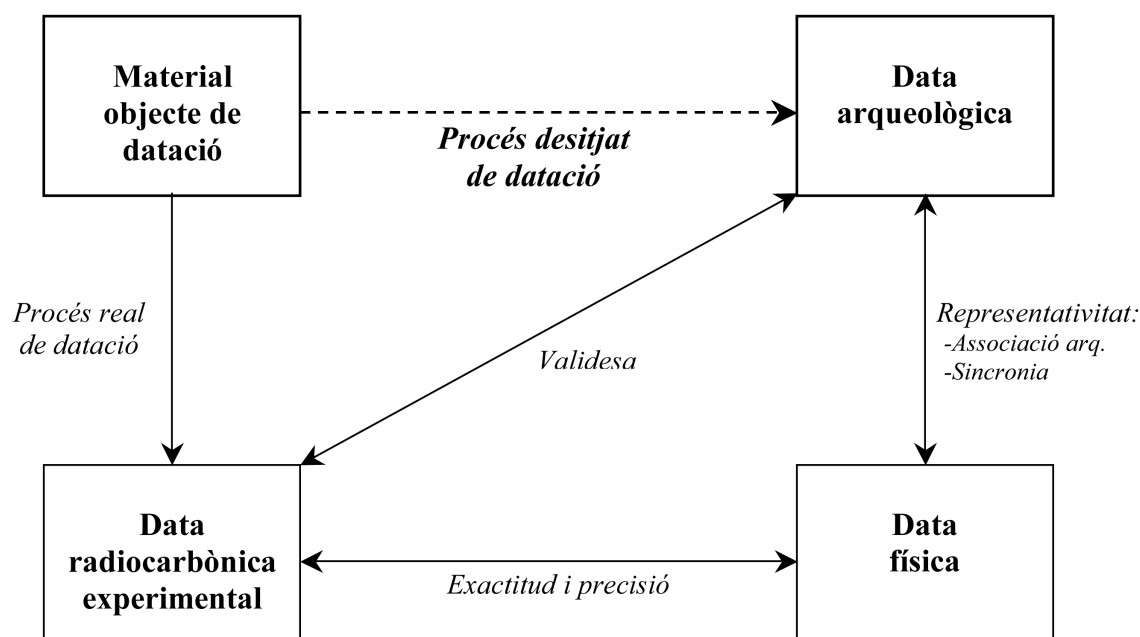


Figura 4. Relació entre les diferents dates conceptuals implicades en el procés de la datació per radiocarboni i els requisits de validesa d'una data radiocarbònica

- EVIN, J. 1983, Les matériaux d'origine terrestre utilisés pour les datations par le radiocarbone/Materials of terrestrial origin used for radiocarbon dating, *PACT 8: ¹⁴C and Archaeology*. Strasbourg, Conseil de l'Europe/Council of Europe, 235-274.
- HUGHEN, K.A., BAILLIE, G.L., BARD, E. *et al.* 2004, Marine04 Marine Radiocarbon Age Calibration 0–26 cal kyr BP, *Radiocarbon* 46 (3), 1059-1086.
- MARTÍN, A., MESTRES, J.S. 2002, Periodització des de la fi del Neolític fins a l'Edat del Bronze a la Catalunya Sudpirinenca. Cronologia relativa i absoluta, *Actes del XII Col·loqui Internacional d'Arqueologia de Puigcerdà: De la fin du Néolithique a l'Âge du Bronze entre l'Èbre et la Garonne*, Puigcerdà, 77-130.
- MCCORMAC, F.G., HOGG, A.G., BLACKWELL, P.G. *et al.* 2004, SHCal 04 Southern Hemisphere Calibration, 0–11.0cal kyr BP, *Radiocarbon* 46(3), 1087-1092.
- MESTRES, J.S. 2000a, Utilización inductiva y deductiva de las fechas radiocarbónicas. Ejemplo de aplicación a la prehistoria de la isla de Menorca (Baleares), *Contributos das Ciências e das Tecnologias para a Arqueologia da Península Ibérica. Actas do 3º Congresso de Arqueologia Peninsular*, Vol. IX, ADE-CAP, Porto (Portugal), 117-139.
- MESTRES, J.S. 2000b, La datació per Radiocarboni. Una visió actual, *Tribuna de Arqueologia 1997-1998*, Generalitat de Catalunya, Departament de Cultura, Barcelona, 195-239.
- MESTRES, J.S. 2003, La química i la cronologia: La datació per radiocarboni, *Revista de la Societat Catalana de Química* 4, 10-25.
- MESTRES, J.S., MARTÍN, A. 1996, La calibración de las fechas radiocarbónicas y su contribución al estudio del Neolítico Catalán, *Rubricatum* 1(2), 791-804.
- MONGE SOARES, A.M., ALVEIRINHO DIAS, J.M. 2006, Coastal Upwelling and Radiocarbon—Evidence for Temporal Fluctuations in Ocean Reservoir Effect Off Portugal during the Holocene, *Radiocarbon* 48 (1), 45–60.
- MONGE SOARES, A.M., ALVEIRINHO DIAS, J.M. 2007, Reservoir Effect of Coastal Waters Off Western and Northwestern Galicia, *Radiocarbon* 49 (2), 925–936.
- REIMER, P.J., BAILLIE, G.L., BARD, E. *et al.* 2004, IntCal04 Terrestrial Radiocarbon Age Calibration 0–26 cal kyr BP, *Radiocarbon* 46(3), 1029-1058.
- SCHWARCZ, H.P. 1991, Some theoretical aspects of paleodiet studies, *Journal of Archaeological Science* 18, 261-275.

